

Determining surface information involves using CCD camera to acquire image of projected structure with periodically variably intensity characteristic shifted by fraction of grid constant

Publication number: DE19930816

Also published as:

Publication date: 2001-01-04



JP2001099618 (A)

Inventor: SCHOEPPE GUENTER (DE)

Applicant: ZEISS CARL JENA GMBH (DE)

Classification:

- International: G01B11/00; G01B11/30; G02B21/00; G02B21/36;
G01B11/00; G01B11/30; G02B21/00; G02B21/36;
(IPC1-7): G01B11/30

- European: G01B11/30

Application number: DE19991030816 19990701

Priority number(s): DE19991030816 19990701

[Report a data error here](#)

Abstract of DE19930816

The method involves using a CCD camera to acquire the image of a projected structure with a periodically variably intensity characteristic shifted by $1/n$ times the grid constant, where n is integral and greater than 2. Information is acquired for each image representing the light field intensity multiplied by the respective grid phase. The sine and cosine components are extracted from the images and used to derive the degree of modulation. An Independent claim is also included for an arrangement for altering a projection direction.

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide

⑯ Aktenzeichen: 199 30 816.0
⑯ Anmeldetag: 1. 7. 1999
⑯ Offenlegungstag: 4. 1. 2001

⑯ Anmelder:
Carl Zeiss Jena GmbH, 07745 Jena, DE

⑯ Erfinder:
Schöppe, Günter, 07745 Jena, DE

⑯ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
zu ziehende Druckschriften:

DE 197 38 179 C1
DE 33 28 753 C2
DE 35 32 464 A1
DE 93 08 486 U1
US 54 93 400
US 52 62 844
WO 98 45 745 A1
WO 97 06 509 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑯ Verfahren und Vorrichtung zur Tiefenselektion von Mikroskopbildern

⑯ Verfahren zur Ermittlung einer Oberflächeninformation mittels einer aufprojizierten Struktur mit periodisch veränderlichem Helligkeitsverlauf, die um jeweils $1/n$, $n =$ ganzzahlig, größer 2, der Gitterkonstante verschoben wird und das Projektionsbild mittels einer CCD-Kamera erfaßt wird,
und für jeden Bildpunkt Informationen ermittelt werden, die die Helligkeit multipliziert mit der jeweiligen Gitterphase darstellen, aus diesen Bildern die sinus- und cosinus-Anteil extrahiert werden und daraus

menkörpers gekoppelt ist, daß nach mindestens drei Kippschritten eine Änderung der Orientierung des Prismenkörpers erfolgt.

I. $I_{xy} = I_{obxy} * m * \sin x$

II: $I_{xy} = I_{obxy} * m * \cos x$

gebildet werden und aus I. und II. der Modulationsgrad m berechnet und zur Darstellung verwendet wird, mit

$$I_{obxy} * \sqrt{\sin^2 x + \cos^2 x}$$

$m = \frac{I_{xy}}{I_{obxy}}$

sowie

Anordnung zur Änderung der Projektionsrichtung, eines über mindestens einen keilförmigen, um die optische Achse drehbaren Prismenkörper und eine zur optischen Achse verkippbaren Planplatte auf eine Oberfläche projizierten Gitters, wobei die Ansteuerung der Kippbewegung der Planplatte so mit der Drehbewegung des Pri-

Beschreibung

Es ist bekannt, mittels strukturierter Beleuchtung sowohl Tiefenmessungen in Mikroskopbildern durchzuführen als auch außerhalb der Fokusebene liegende Bildteile zu unterdrücken (AXIOMAP von ZEISS, WO 97/06509, WO 98/45745).

In US 5493400 (DE 93 08 486 U) wird eine schräge Gitterprojektion mittels keilförmiger Glaskörper mit wechselbarer Orientierung erzeugt.

Die Grundlage dieser Verfahren sind aus der Interferenzmikroskopie abgeleitete Verfahren, bei denen in die Objekt ebene projizierte periodische Strukturen in Interferenzmuster umgedeutet und die damit möglichen Auswertungen durchgeführt werden.

Dazu werden Gitter in die Objektebenen abgebildet und um ganzzahlige Bruchteile der Gitterkonstante entweder kontinuierlich über eine bestimmte Zeit (Phaseshift-Verfahren) oder schrittweise (Phase-Step-Verfahren) verschoben. In jedem Zeitintervall bzw. von jeder Stellung des Gitters wird mittels einer pixelsynchronen CCD-Kamera ein Bild eingezogen und die Bilder miteinander verrechnet.

Am einfachsten sind die Verhältnisse zu überschauen, wenn ein Gitter mit \cos^2 - bzw. \sin^2 -förmiger Intensitätsvariation in Richtung der Gitterperiodizität, z. B. in x-Richtung drei mal um jeweils $\frac{1}{4}$ der Gitterkonstante verschoben wird.

(Prinzipiell funktioniert das Verfahren bei Verschiebungen mit jedem ganzzahligen Bruchteil $< 1/2$ der Gitterkonstante.)

Dabei wird das Bild der Ausgangslage als Bild mit sin-förmiger Intensitätsmodulation senkrecht zur Richtung der Gitterstriche ($\sin x$), das nächste als $\cos x$, das folgende als $-\sin x$ und das letzte als $-\cos x$ gedeutet.

Damit liegen für jeden Bildpunkt Informationen vor, die die Hellfeldintensität multipliziert mit der jeweiligen Gitterphase darstellen. Aus diesen Ausgangsdaten können eine Reihe weiterer interessanter Informationen abgeleitet werden.

Die 4 Bilder können beschrieben werden als:

$$1. I_{xy1} = 0.5 I_{obxy} \cdot (1 + m \cdot \sin x)$$

$$2. I_{xy2} = 0.5 I_{obxy} \cdot (1 + m \cdot \cos x)$$

$$3. I_{xy3} = 0.5 I_{obxy} \cdot (1 - m \cdot \sin x)$$

$$4. I_{xy4} = 0.5 I_{obxy} \cdot (1 - m \cdot \cos x)$$

Dabei ist I_{obxy} die von der Objektstelle x, y zur Abbildung beitragende Intensität (Reflektivität, Transmission, Fluoreszenz), m der Modulationsgrad der Gitterabbildung.

Subtrahiert man 3 von 1, bzw. 4 von 2, dann erhält man:

$$I. I_{xy} = I_{obxy} \cdot m \cdot \sin x$$

$$II. I_{xy} = I_{obxy} \cdot m \cdot \cos x$$

Bei dieser Prozedur verschwinden die Gleichanteile.

Addiert man umgekehrt 3. zu 1. bzw. 4. zu 2., so verschwindet in beiden Fällen die Modulation des Bildinhaltes mit den Winkelfunktionen. Man erhält die Hellfeldbilder A_1 bzw. A_2 :

$$A_1: I_{xy} = I_{xy3} + I_{xy1} = I_{obxy}$$

d. h., in diesen 4 Teilbildern sind 2 vollständige Hellfeldbilder enthalten.

Die Modulation m mit den Winkelfunktionen hat diesen Bildern Informationen über den Abstand zur exakten Fokusebene aufgeprägt.

In Abhängigkeit von der verwendeten Gitterkonstante, 5 der Objektivapertur, der Wellenlänge und dem Abstand von der Fokusebene ändert sich der Modulationsgrad m der Gitterabbildung.

Bei Verwendung eines Objektives, einer Lichtquelle und 10 eines Gitters bleiben die ersten Einflußfaktoren konstant, d. h. der Modulationsgrad ist bei gegebener Anordnung eine Funktion der Fokussierung.

Dieser Modulationsgrad multipliziert mit der Hellfeldinformation kann aus I. und II. mit Hilfe des trigonometrischen Pythagoras durch einzelnes Quadrieren und anschließendes addieren berechnet werden:

$$I_{obxy} * \sqrt{\sin^2 x + \cos^2 x}$$

$$m = \frac{I_{obxy}}{I_{obxy}}$$

Stellt man m allein als Funktion des Ortes dar, so erhält man ein "Abstandsbild" der Bildpunkte von der optimalen 25 Fokusebene. Läßt man die Division durch das Hellfeldbild weg, so erhält man eine Information, die der nahezu Identisch ist, die in Konfokal-Mikroskopen erhalten werden kann. Die Objekteigenschaften werden mit zunehmendem Abstand von der Objekt ebene mit immer geringerer Intensität dargestellt, d. h. es wird eine bestimmte Schicht des Objektes dargestellt.

Da der Modulationsgrad $m \leq 1$ ist, kann die Tiefenselektivität durch Potenzieren erhöht werden.

Es ist durch Auswahl der Grenzen, d. h. das Setzen von 35 Schwellwerten für die Darstellung, möglich, eine mehr oder weniger dicke Schicht in einem synthetischen Bild allein darzustellen, indem durch die Schwellwerte alles von der Darstellung ausgeschlossen wird, was vom Fokus entfernt liegt.

Begrenzt wird diese Möglichkeit durch das Signal-Rausch-Verhältnis, den Schrittfehlern bei der Gitterverschiebung, den Unlinearitäten bei der Detektion und der Zahl der Stützstellen, mit denen das aufmodulierte Gitter durch die im allgemeinen benutzte CCD-Kamera dargestellt wird.

Prinzipiell können aus den bisher beschriebenen Teilbildern folgende Informationen vom Objekt gewonnen werden:

1. vollständige Hellfeldbilder ohne aufmodulierte Gitterstruktur (A_1, A_2)
2. "Abstandsinformationen" von Objektbereichen vom exakten Fokus (ohne Richtung) (m)
3. Hellfeldinformationen vom Objekt, die mit zunehmendem Abstand vom Fokus dunkler werden (Confo-kalbilder) ($A \cdot m$)
4. Bilder, bei denen nur eine dünne Schicht um den Fokus als vollständiges Hellfeldbild dargestellt wird (A bei $m > \text{Grenzwert}$)
5. Durch Potenzieren von m einen wählbar kleineren Bereich um den Fokus herum.

Bei zentraler Beleuchtung enthalten die Bilder keine Informationen, ob sich ein ausserhalb der Fokusebene liegender Bildpunkt extra- oder intrafokal befindet.

Durch schräge Gitterprojektion ist es aber vorteilhaft möglich, diese Information zu gewinnen.

In Abhängigkeit von der Objekthöhe sind die Gitterstri-

che in Richtung der Inzidenz der Beleuchtung mehr oder weniger verschoben.

Aus obenstehenden Gleichungen I. und II. kann dann durch Division analog zu interferenzmikroskopischen Untersuchungen pixelweise eine Phaseninformation φ_{xy} gewonnen werden:

$$\varphi_{xy} = \arctan \frac{\sin x}{\cos x}$$

Dabei verschwinden der Modulationsgrad und die Objektintensität.

(Damit kann entschieden (was heißt das – welcher Vorgang läuft ab?) werden, ob das jeweilige Pixel ober- oder unterhalb der Fokusebene liegt.

Durch das Vorzeichen von φ kann entschieden werden, ob das jeweilige Pixel ober- oder unterhalb der Fokusebene liegt. Dabei hängt es von den gerätetechnischen Gegebenheiten und verfahrensmäßigen Vereinbarungen ab, ob ein positives Vorzeichen ober- oder unterhalb und umgekehrt bedeutet.

Erfahrungsgemäß zeigen Rekonstruktionsalgorithmen für das Oberflächenprofil besonders bei stark strukturierten Objekten Fehler oder versagen gänzlich, wenn Bereiche mit geringer bzw. ohne Modulation vorhanden sind.

Dem letztgenannten Umstand kann man begegnen, indem man jeweils 4 Bilder für Beleuchtung mit entgegengesetzter Inzidenz gewinnt.

Projektionsabhängige Verzerrungen werden durch Addition der synthetischen Bilder kompensiert.

Es wird nicht die Phase selbst, sondern die gegenseitige Lage der Gitterstriche durch Vergleich ihrer Lage im ersten "Bilderquartett" gegenüber ihrer Lage im zweiten ermittelt. Dabei ist es vorteilhaft, zusätzlich den Modulationsgrad mit zu bestimmen und solche Bereiche, deren Modulation unterhalb einer bestimmten Schwelle liegt, auf mathematischem Weg von der Darstellung auszuschließen.

Sind die Striche des Gitters in Bild A₁ gegenüber Bild A₂ in eine bestimmte Richtung verschoben, so bedeutet das auch eine aus den anordnungsbedingten Verhältnissen bedingte Richtung der Defokussierung.

Diese Verfahrensweise gestattet – im Gegensatz zu den bekannten Algorithmen – auch die Untersuchung extrem strukturierter und/oder in der Tiefe ausgedehnter Objekte und in Verbindung mit den im Mikroskop sowieso vorhandenen Feintrieb durch Gewinnung von Bildern des Objektes aus verschiedenen Ebenen die 3-dimensionale Rekonstruktion solcher Objekte.

Die Verwendung von schiefer Beleuchtung hat für die Tiefenselektivität und die laterale Auflösung des Bildes weitere Vorteile.

Die schiefe Gitterprojektion hat bei regulär reflektierenden Oberflächen mit geneigten Flächen einen weiteren Vorteil.

Durch die Reflektion wird die zurückkehrende Information um den doppelten Neigungswinkel der Flächenelemente zurückgeworfen. Das führt auch bei Verwendung von Objektiven mit höchsten Aperturen zu einer Begrenzung des untersuchbaren Neigungsbereiches auf $\leq 36^\circ$. Durch schiefe Projektion kann der nutzbare Neigungsbereich bei den vorgenannten Verfahren, die nicht zwischen intra- und extrefokaler Lage der Objekteinzelheiten unterscheiden, um den von 90° verschiedenen Projektionswinkel erweitert werden.

Im AXIOMAP war ein Schieber mit einem Gitter mit \cos^2 -förmiger Intensitätsvariation in die Leuchtfeldblenden-

ebene einschiebbar. Das Gitter wurde mit einem Schrittmotor verschoben.

Zwischen Gitter und Aperturblende war ein umschaltbarer Träger mit zwei gleichen Keilen, aber entgegengesetzter Orientierung angebracht. Damit konnte die Neigung der Beleuchtung verändert werden.

Nachteilig an dieser Vorrichtung war die große Umschaltzeit von einem zu einem anderen Zustand. Es bestand auch ohne Ausbau der Zusatzeinrichtung keine Möglichkeit zur zentralen Beleuchtung.

Diese Nachteile sollen mit der neuen Vorrichtung vermieden werden.

Vorrichtung

In einem in die Leuchtfeldblendenebene eines nicht dargestellten Mikroskopes einsetzbaren nicht dargestellten Schieber befindet sich fest eingebaut ein Gitter G mit vorzugsweise \cos^2 -förmigem Helligkeitsverlauf.

Die Gitterkonstante ist wegen eines guten Kompromisses einer guten Rekonstruierbarkeit des Intensitätsverlaufes im Signal und einer hohen Tiefenselektivität so abgestimmt, daß eine Gitterperiode auf ca. 8–12 Pixel einer CCD-Kamera fällt. (Unter diesen Bedingungen wird die Modulationsstiefe mit Sicherheit mit 95% des tatsächlichen Wertes wiedergegeben.)

Zwischen Gitter und nicht dargestellter Kollimatorlinse des Illuminators ist in Fig. 1a ein Planplattenmikrometer PM angeordnet, das durch einen Scanner S (z. B. Galvano-meterscanner) angetrieben stufenweise um eine Drehachse A verkippt wird.

Der Scanner wird so angesteuert, daß durch Verkippen der Planplatte 3–4 jeweils um $\frac{1}{4}$ der Gitterkonstante verschobene Einstellungen des Gitters in der Objektebene zu stehen kommen. Dabei ist der Scannbereich des Scanners nur teilweise, beispielweise zu 30% ausgenutzt.

Zwischen Gitter und nicht dargestellter Aperturblende ist ein schwacher Keil K1 (Prismenkörper) gegen zwei Anschläge drehbar angeordnet. Ein weiterer nahezu gleicher Keil K2 ist fest zwischen Planplattenmikrometer PM und nachfolgender nicht dargestellter Optik angeordnet. Die Wirkung beider Keile ist über die jeweiligen Keilwinkel so abgestimmt, daß durch ihre Überlagerung beim Anliegen des Keiles K1 am ersten Anschlag das Bild der Aperturblende in einer ersten Richtung senkrecht zu den Gitterstrichen verschoben ist, beim Anliegen am anderen Anschlag um den gleichen Betrag in die entgegengesetzte Richtung.

Nachdem die 3–4 Einstellungen vorgenommen wurden, bewegt sich der Scanner in die Nähe einer Endlage und schaltet dabei mit einer Umschaltfeder den beweglichen Keil in eine der beiden Endlagen. Dort wird er durch ein mechanisches Flipp-Flop (ähnlich Lichtschalter) festgehalten.

Dies ist in Fig. 2 dargestellt.

Der Keil K1 ist in einer Halterung H in (zwei Richtungen verkippbar) um die opt. Achse AS drehbar angeordnet.

Die Scannerachse A weist einen Mitnehmer M auf, der erst bei Erreichen einer Endlage über einen oberen oder unteren Mitnehmer MO, MU auf die Halterung einwirkt und bewirkt, daß ein Wechsel der Halterung zwischen oberem und unteren Anschlag AO, AU erfolgt.

Fester und beweglicher Keil erzeugen eine resultierende Wirkung, die die Dezentrierung der Aperturblende in der Objektiv-Pupille in einer Richtung senkrecht zu den Gitterstrichen zur Folge haben, wie in Fig. 1b schematisch dargestellt. Damit wird schiefe Beleuchtung in einer Richtung erzeugt.

In einer weiteren Phase des Verfahrens bewegt sich der Scanner in die Nähe der anderen Endlage, so daß der beweg-

liche Keil gegen den anderen Anschlag geschaltet wird und schiefe Beleuchtung mit entgegengesetzter Inzidenz entsteht.

Für die auch mögliche Auswertungen ohne schiefe Beleuchtung wird mittels einer Sperre der bewegliche Keil in der Mittellage gehalten, so daß kein Versatz des Bildes der Aperturblende in der Austrittspupille des Mikroskopobjektivs entsteht.

Die Umschaltung der verschiedenen Einstellungen kann sehr rasch (in ca. 2-5 ms) erfolgen. Die Genauigkeit der Be wegung erreicht ohne Schwierigkeiten die erforderliche Genauigkeit von ca. 1/1000 der Gitterkonstante (anderfalls entstehen im ausgewerteten Bild unerwünschte Streifenstrukturen, meist mit 2- bzw. 4-facher Ortsfrequenz des Gitters).

Die Erfassung der Bilddaten erfordert eine pixelsynchrone CCD-Kamera. Es genügt im allgemeinen eine Datentiefe von 8 bit. Die Linearität von CCD-Kameras reicht im allgemeinen nicht aus, um oberwellenfreie Bildrekonstruktionen zu erzeugen. Diesem Mangel kann wie beim AXIOMAP durch eine look-up-table abgeholfen werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung einer Oberflächeninformation mittels einer aufprojizierten Struktur mit periodisch veränderlichem Helligkeitsverlauf, die um jeweils $1/n$, $n = \text{ganzzahlig}$, größer 2, der Gitterkonstante verschoben wird und das Projektionsbild mittels einer CCD-Kamera erfaßt wird, 25 und für jeden Bildpunkt Informationen ermittelt werden, die die Hellfeldintensität multipliziert mit der jeweiligen Gitterphase darstellen, aus diesen Bildern die sinus- und cosinus Anteile extrahiert werden und daraus

$$\text{I. } I_{xy} = I_{obxy} \cdot m \cdot \sin x$$

$$\text{II. } I_{xy} = I_{obxy} \cdot m \cdot \cos x$$

gebildet werden

und aus I. und II. der Modulationsgrad m berechnet und zur Darstellung verwendet wird, mit

$$I_{obxy} * \sqrt{\sin^2 x + \cos^2 x}$$

$$m = \frac{I_{obxy}}{I_{obxy}}$$

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei weiterhin Hellfeldbilder A ohne aufmodulierte Gitterstruktur gebildet werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, 55 zur Ermittlung einer Oberflächeninformation mittels einer aufprojizierten Struktur mit periodisch veränderlichem Helligkeitsverlauf, die um jeweils $\frac{1}{4}$ der Gitterkonstante verschoben wird und das Projektionsbild mittels einer CCD-Kamera erfaßt wird, und für jeden Bildpunkt Informationen ermittelt werden, die die Hellfeldintensität multipliziert mit der jeweiligen Gitterphase darstellen, beschrieben als:

$$1. I_{xy1} = 0.5 I_{obxy} \cdot (1 + m \cdot \sin x)$$

$$2. I_{xy2} = 0.5 I_{obxy} \cdot (1 + m \cdot \cos x)$$

$$3. I_{xy3} = 0.5 I_{obxy} \cdot (1 - m \cdot \sin x)$$

$$4. I_{xy4} = 0.5 I_{obxy} \cdot (1 - m \cdot \cos x),$$

wobei 3 von 1 sowie 4 von 2 subtrahiert werden, so daß I, II entstehen als

$$\text{I. } I_{xy} = I_{obxy} \cdot m \cdot \sin x$$

$$\text{II. } I_{xy} = I_{obxy} \cdot m \cdot \cos x,$$

und aus I. und II. der Modulationsgrad m berechnet und zur Darstellung verwendet wird, mit

$$I_{obxy} * \sqrt{\sin^2 x + \cos^2 x}$$

$$m = \frac{I_{obxy}}{I_{obxy}}$$

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei 3. zu 1. bzw. 4. zu 2. addiert werden, so daß in beiden Fällen die Modulation des Bildinhaltes mit den Winkelfunktionen verschwindet und man aus den vier Teilbildern die vollständigen Hellfeldbilder A₁ bzw. A₂ erhält:

$$\text{A}_1: I_{xy} = I_{xy3} + I_{xy1} = I_{obxy}$$

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-4, wobei 1. vollständige Hellfeldbilder ohne aufmodulierte Gitterstruktur (A₁, A₂) und/oder 2. "Abstandsinformationen" von Objektbereichen vom exakten Fokus (ohne Richtung) (m) und/oder 3. Hellfeldinformationen vom Objekt, die mit zunehmendem Abstand vom Fokus dunkler werden (Confokalbilder) (A · m) und/oder 4. Bilder, bei denen nur eine dünne Schicht um den Fokus als vollständiges Hellfeldbild dargestellt wird (A bei m > Grenzwert) und/oder 5. Bilder aus m mit n größer 1 potenziert

zur Darstellung verwendet werden.

6. Verfahren zur Ermittlung einer Oberflächeninformation mittels einer aufprojizierten Struktur mit periodisch veränderlichem Helligkeitsverlauf, die um jeweils $1/n$ der Gitterkonstante verschoben wird, wobei das Projektionsbild mittels einer CCD-Kamera erfaßt wird und die Struktur unter einem Winkel ungleich 90 Grad aufprojiziert wird, wobei jeweils n Bilder für Beleuchtung unter entgegengesetzt etwa gleichen Projektionswinkel aufgenommen werden, aus diesen jeweils ein synthetischens Bild gewonnen wird und diese Bilder separat als Stereobildpaar und /oder addiert dargestellt werden.

7. Verfahren zur Ermittlung einer Oberflächeninformation mittels einer aufprojizierten Struktur mit periodisch veränderlichem Helligkeitsverlauf, die um jeweils $1/n$, n größer 2 der Gitterkonstante verschoben wird und das Projektionsbild mittels einer CCD-Kamera erfaßt wird, und für jeden Bildpunkt Informationen ermittelt werden, die die Hellfeldintensität multipliziert mit der jeweiligen Gitterphase darstellen, aus diesen Bildern die sinus- und cosinus-Anteile extrahiert werden und daraus

$$\text{I. } I_{xy} = I_{obxy} \cdot m \cdot \sin x$$

$$\text{II. } I_{xy} = I_{obxy} \cdot m \cdot \cos x,$$

gebildet werden und aus I. und II. durch Division eine Phaseninformation φ_{xy} gewonnen wird, um das jeweilige Pixel oberhalb oder unterhalb der Fokusebene zuzuordnen: 5

$$\sin x$$

$$\varphi_{xy} = \arctan \frac{\sin x}{\cos x}$$

10

$$\cos x$$

8. Verfahren zur Ermittlung einer Oberflächeninformation mittels einer aufprojizierten Struktur mit periodisch veränderlichem Helligkeitsverlauf, die um jeweils $\frac{1}{4}$ der Gitterkonstante verschoben wird, wobei das Projektionsbild mittels einer CCD-Kamera erfaßt wird und die Struktur unter einem Winkel ungleich 90 Grad aufprojiziert wird, wobei jeweils 4 Bilder für Beleuchtung unter entgegengesetzten Projektionswinkeln aufgenommen werden, jeweils beschrieben als: 15

$$1. I_{xy1} = 0.5 I_{obxy} \cdot (1 + m \cdot \sin x)$$

25

$$2. I_{xy2} = 0.5 I_{obxy} \cdot (1 + m \cdot \cos x)$$

$$3. I_{xy3} = 0.5 I_{obxy} \cdot (1 - m \cdot \sin x)$$

$$4. I_{xy4} = 0.5 I_{obxy} \cdot (1 - m \cdot \cos x),$$

30

wobei 3 von 1 sowie 4 von 2 subtrahiert werden, so daß I, II entstehen als

$$\text{I. } I_{xy} = I_{obxy} \cdot m \cdot \sin x$$

35

$$\text{II. } I_{xy} = I_{obxy} \cdot m \cdot \cos x,$$

und aus I. und II. kann durch Division eine Phaseninformation φ_{xy} gewonnen werden, um das jeweilige Pixel oberhalb oder unterhalb der Fokusebene zuzuordnen: 40

$$\sin x$$

$$\varphi_{xy} = \arctan \frac{\sin x}{\cos x}$$

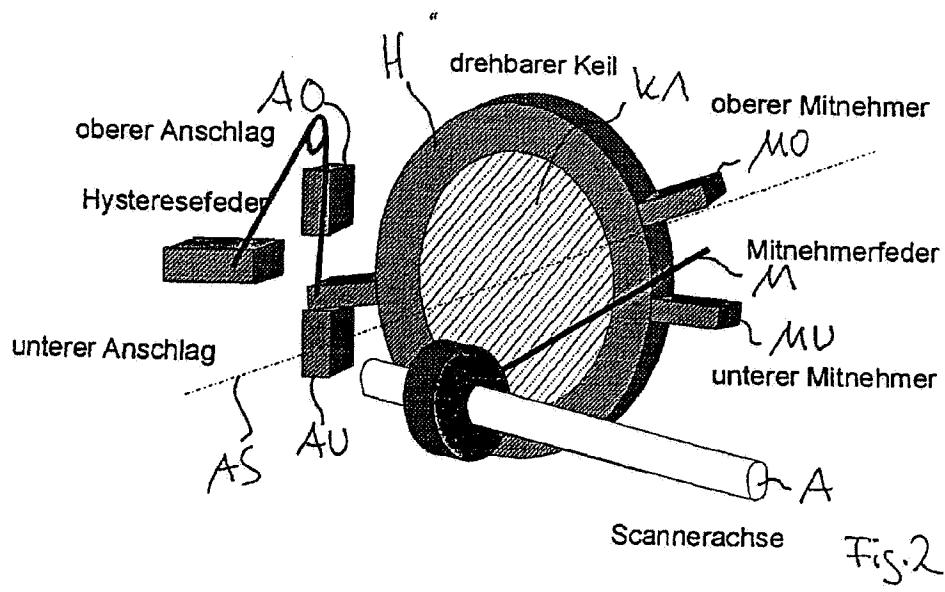
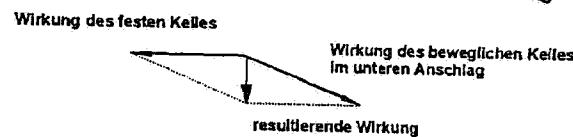
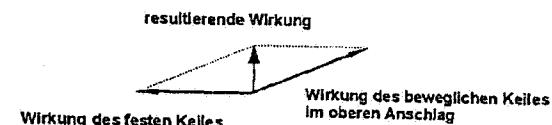
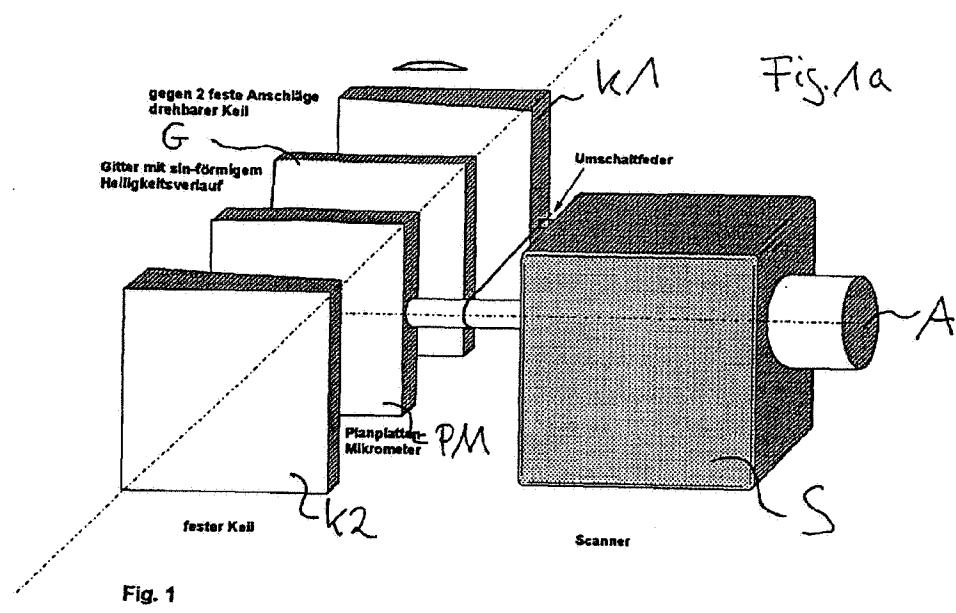
45

$$\cos x$$

9. Anordnung zur Änderung der Projektionsrichtung, insbesondere nach einem der Ansprüche 1–8, eines über mindestens einen keilförmigen, um die optische Achse drehbaren Prismenkörper und eine zur optischen Achse verkippbaren Planplatte auf eine Oberfläche projizierten Gitters, wobei die Ansteuerung der Kippbewegung der Planplatte so mit der Drehbewegung des Prismenkörpers gekoppelt ist, daß nach mindestens drei Kippschritten eine Änderung der Orientierung des Prismenkörpers erfolgt. 50

10. Anordnung nach Anspruch 9, wobei ein zweiter feststehender Prismenkörper im Strahlengang vorgesehen ist. 60

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen



Prinzip des Keilrichtungswechsels